

固结扩盘桩在滨海软土斜拉桥中的应用

刘海涛¹, 田山坡¹, 王甫友², 裴晓峰³, 祝波³, 石海洋², 张一民²

(1. 中国铁路设计集团有限公司, 天津市 300241; 2. 天津市交通科学研究院, 天津市 300060; 3. 广东磐石基础工程技术有限公司, 广东 深圳 518101)

摘要: 依托天津集疏运货运通道跨北塘西站转体斜拉特大桥工程, 针对滨海新区软土地基、液化土层复杂地质条件下的高荷载群桩基础中超百米钻孔灌注桩施工质量与安全风险大的问题, 创新性地提出采用固结扩盘桩群桩技术, 并围绕方案优化、施工工艺、检测技术进行了研究。研究结果表明: 对比常规钻孔灌注桩, 采用固结扩盘桩进行优化后, 桩长由超百米缩短至 72 m, 有效避免了软土区超长桩塌孔质量风险, 同时基坑支护及基础的工程概算费用也由 7 828 万元降低到 3 759 万元, 费用降低了 52%; 基于反循环成孔工艺, 成功研发了一种“钻扩一体钻头”装置, 并形成了一套盘腔尺寸判定方法, 攻关了盘腔高效扩孔施工、盘腔与混凝土完整性检测等技术难题。研究显示固结扩盘桩技术具有显著的经济效益、社会效益和环境效益, 同时固结扩盘桩对承载力的大幅提高, 使得更大跨径、更高荷载的桥梁建造成为可能。

关键词: 固结扩盘桩; 软土地质; 反循环成孔; 钻扩一体钻头; 盘腔尺寸检测; 转体斜拉桥

中图分类号: U445.55; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)12-0322-06

Application of Consolidated Expansion Pile in Coastal Soft Soil Cable-Stayed Bridges

LIU Haitao¹, TIAN Shanpo¹, WANG Fuyou², PEI Xiaofeng³, ZHU Bo³, SHI Haiyang², ZHANG Yimin²

(1. China Railway Design Group Co., Ltd., Tianjin 300308, China; 2. Tianjin Transportation Science Institute, Tianjin 300060, China;

3. Guangdong Panshi Basic Engineering Technology Co., Ltd., Shenzhen 518101, China)

Abstract: Relying on the project of the rotating cable-stayed extra-large bridge spanning West Beitang Station for the Tianjin Freight Transportation Channel, aiming at the problem of high construction quality and safety risks of over 100 meters of bored cast-in-place piles in high-load group pile foundations under complex geological conditions such as soft soil foundation and liquefied soil layer in Binhai New Area, the consolidated expansion pile group technology is innovatively proposed. And the scheme optimization, construction technology and detection technique are studied. The results show that compared with the conventional bored cast-in-place pile, the optimized consolidated expansion pile can shorten the pile length from 100m to 72 m, effectively avoiding the quality risk of super-long pile collapse in soft soil areas. At the same time, the estimated cost of foundation pit support and foundation engineering has also been reduced from 78.28 million yuan to 37.59 million yuan, a cost reduction of 52%. Based on the reverse circulation pore forming technology, a device of integrated drill bit for drilling and reaming has been successfully developed, and a set of methods for determining the size of the disc cavity has been formed. The technical challenges such as efficient hole expansion construction in the disc cavity and the integrity testing of the disc cavity and concrete have been overcome. The research shows that the consolidated expansion pile technology has the significant economic, social and environmental benefits. At the same time, the significant increase in bearing capacity brought by consolidated expansion piles makes it possible to build bridges with longer spans and higher loads.

Keywords: consolidated expansion pile; soft soil geology; reverse circulation pore forming; integrated drill bit for drilling and reaming; size detection of disc cavity; rotating cable-stayed bridge

收稿日期: 2025-05-22

基金项目: 天津市交通运输科技发展规划项目(2023-3)

作者简介: 刘海涛(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事公路和市政桥梁的设计工作。

通信作者: 石海洋(1990—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事基础工程、岩土工程领域的相关科研与技术咨询工作。电子信箱: 215460706@qq.com

0 引言

随着滨海地区城市化进程加速与基础设施建设的复杂化, 传统桩基技术在高承载力需求、复杂地质条件及成本控制等方面面临着严峻挑战。固结扩盘桩^[1-2]作为一种新型桩基技术, 通过将扩盘结构与复

合地基处理技术结合,能显著提升桩基的端承力和抗拔性能,已成为近年来桩基工程领域的重要研究方向。

与传统旋扩成桩工艺相比,固结扩盘桩核心优势在于,通过对土体高喷预加固,能彻底避免扩盘过程中的塌孔问题;成桩后通过盘体与固结体的协同作用,能优化荷载传递路径,大幅缩短桩长并减少材料用量,从而为滨海软土地区桩基优化提供了新选择。

目前行业内对该类型桩基进行了较多研究。早在 2010 年,霍少磊^[3]介绍了一种智能化旋扩桩施工技术,从现场试验和理论研究两部分对旋扩桩施工工艺和荷载传递规律作了较为深入的分析。王海山等^[4]依托沾化至临淄公路引黄济青大桥,创新性地将扩盘桩应用于超大直径桥梁桩基础中,项目经济效益显著,相比原设计方案,仅混凝土就减少了 50% 工程量。黄生根等^[5-6]采用二维离散元软件 PFC 模拟多级旋扩桩在单桩竖向受荷条件下的静载试验,揭示了多级旋扩桩的承载特性以及桩-土相互作用规律,实现了从微观角度分析桩周土体颗粒受影响的区域以及桩周土体颗粒细观结构。张乾青等^[7-8]联合山东倍特力地基工程技术有限公司,通过开展理论分析、模型试验、现场压桩测试等,揭示了喷扩锥台压灌桩承载机理、沉降分析方法、合理构造及设计方法等。张坤标等^[9-10]将支盘桩应用于软土地基加固领域,并建议在深厚软土地基中,采用“短桩长”的支盘桩多桩承载体系。李勇等^[11-12]为研究挤扩支盘桩群桩的承载受力和变形性能,在行业内首次设计 1:10 大比尺挤扩支盘桩室内群桩模型试验,初步揭示了支盘桩群桩综合效应系数和盘体分项效应系数,研究了不同盘体数量、不同桩间距、不同盘埋深等对群桩承载性能的影响。蒲春平等^[13-14]针对传统挤扩类桩基设计效率低的问题,研究了一种基于 BIM 技术的设计系统,实现了桥梁挤扩支盘桩的自动化、批量化和可视化设计。固结扩盘桩设计、施工与检测方法的智能化、信息化、数字化、可视化,是该技术未来发展的重要方向。

固结扩盘桩技术从 2019 年诞生至今,在扩盘桩领域已经开创了多个第一:顺利完成了目前全球最大盘径(4.5 m)和单桩体量最大(456 m³)工程施工——沾临高速引黄济青干渠大桥施工;首次大规模应用在高速公路主线桥工程——京台高速齐济段改扩建工程;首次在全桥实现推广应用工程——德郛高速跨德上高速主线桥;首次应用在斜拉桥主墩

桩基工程——天津集疏运港城大道互通立交上跨北塘西站 2×155 m 斜拉转体特大桥。本文依托天津集疏运工程,从方案优化设计、施工工艺控制、质量检测等方面,系统介绍固结扩盘桩技术在工程上的应用,为日后类似工程提供参考。

1 工程概况

天津集疏运货运通道港城大道互通立交上跨北塘西站特大桥跨铁路桥采用转体施工工艺,转体重量达 35 000 t,下部结构基础反力极大。天津滨海软土地区地质条件较差,位于地震 8 度设防区域,桩端持力层为粉砂层。项目原设计为常规钻孔灌注桩方案,主墩为群桩基础形式,采用 54 根直径 2.0 m 桩基,桩基全部为摩擦桩,桩基长度 100 m,承台厚度 7.5 m,承台基坑为直径 44.562 m 的圆形基坑,基坑深度约 10 m。

主墩固结扩盘桩群桩基础基坑开挖现场图见图 1。



图 1 主墩固结扩盘桩群桩基础基坑开挖现场图

天津滨海软土地区较少有 100 m 及以上超长桩基的施工案例,因此施工技术难度和塌孔风险很大,对施工设备要求高、成桩质量难以保证,且工后沉降较大。此外,根据文献^[15],对于超长大直径桩基,桩基自重与桩基承载力占比增大,平均每立方混凝土可发挥的承载能力降低,混凝土利用效率减小,施工过程中产生的泥皮和沉渣问题更加突出,导致桩基实际承载能力要小于规范计算结果。

为解决上述问题,提出采用固结扩盘桩优化技术。该技术是将土体加固技术与扩盘技术相结合,在以往扩盘桩工艺基础上,提前在预设盘位施工高喷固结体,以避免扩孔时塌孔风险。这种工艺不仅能够充分利用盘底土体抗压承载能力来提高单桩承载力,又能够彻底杜绝目前扩盘类桩技术普遍存在的盘腔易塌孔问题。

固结扩盘桩结构示意图见图 2。

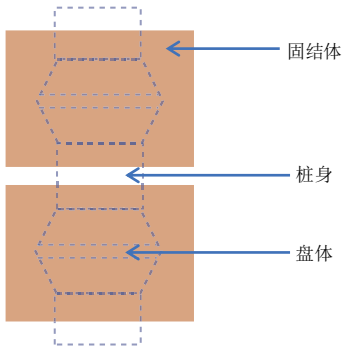


图2 固结扩盘桩结构示意图

2 桩基方案设计

2.1 桩长设计方法

依据《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)计算固结扩盘桩承载力。计算时可不考虑固结体对盘体承载力的贡献,而仅作为承载力发挥的安全储备,并主要起到防塌孔的目的。固结扩盘桩承载力特征值 R_a 计算式为:

$$R_a = \frac{1}{2} u \sum_{i=1}^m q_{ik} l_i + \sum_{j=1}^n A_{pj} q_{rj} + A_p q_r \tag{1}$$

$$q_r q_{rj} = m_0 \lambda [f_{aj} + k_2 \gamma_2 (h_j - 3)] \tag{2}$$

式中: l_i 为承台底面或局部冲刷线以下第*i*层土的厚度,m,当该层土内设有盘时,应减去每个盘高的1.5倍; A_{pj} 为第*j*个盘的净面积(扣除主桩的面积), m^2 ; q_{rj} 为第*j*个盘端土的承载力特征值,kPa; N 为盘的总数; f_{aj} 为盘端土的承载力特征值,kPa,按《公路桥涵地基与基础设计规范》第4.3.3条确定;其他符号及取值应符合《公路桥涵地基与基础设计规范》第6.3.3条的规定。

在保证承载力不降低的前提下,将原54根直径2.0 m常规钻孔灌注桩基方案,优化为34根直径2.0 m/1.5 m固结扩盘桩方案,盘径3 m,桩基长度72 m。承台厚度为6 m,优化后的承台基坑直径为35 m,基坑深度约8.5 m。

固结扩盘桩设计方案见表1。

表1 固结扩盘桩设计方案

桩径/m	盘径/m	盘位标高/m					标高/m		桩长/m
		上盘	中盘1	中盘2	中盘3	底盘	桩顶	桩底	
2.0/1.5	3.0	-29.06	-36.56	-44.06	-64.06	-66.06	-2.06	-74.06	72(其中2.0直径段18 m)

2.2 经济性分析

原方案为钻孔灌注桩基础,基坑支护及基础的工程概算费用约7 828万元;采用固结扩盘桩基础,基坑支护及基础的工程概算费用约为3 759万元,相比原方案造价降低了52%。由此可见,2种方案工程费用相差较大,采用固结扩盘桩基础方案具有显著优势。

方案优化前后经济性测算见表2。

3 施工工艺及质量控制

3.1 施工工艺与流程

固结扩盘桩的施工顺序为:首先施工水泥土复合固结体,按照顺序从底部向上依次施工;固结体养护1周之后,再用反循环或旋挖钻机成孔、扩孔,作为整个工序的最关键环节,扩孔作业需要研发专用扩孔钻头,配合旋挖钻或反循环钻机使用;成孔检测合格后,钢筋笼灌注成桩。

固结体施工工艺流程图和扩孔工艺流程图见图3、图4。

3.2 固结体施工与质量控制

固结体是固结扩盘工艺的主要特征。由于该项目主墩距离铁路最近只有20 m,受邻近铁路施工净

表2 方案优化前后经济性测算

方案	分项编号	工程或费用名称	数量	金额/元
扩盘桩	QL01	基础工程/ m^3	1 3382.1	37 588 461.65
	QL0102	桩基础/ $(m^3 \cdot m^{-1})$	5 885.4 / 5 400	13 411 409.97
	QL010201	灌注桩基础/ m^3	5 885.4	13 411 409.97
	QL0105	承台/ m^3	4 832.8	8 519 541.41
	QL0107	基坑防护/元		1 5657 510.26
	QL010701	防护桩/ m^3	1 806	4 901 615.24
	QL010702	冠梁/ m^3	178.9	287 823.02
	QL010702	钢支撑/t	40.854 6	108 273.99
	QL010703	高压旋喷固结体/m	77 493	945 8841.39
	QL010706	基坑回填/ m^3	679	900 956.63
普通桩	QL01	基础工程/ m^3	30 601.64	7 827 8981.21
	QL0102	桩基础/ $(m^3 \cdot m^{-1})$	16 964.6 / 5 400	35 121 466.12
	QL010201	灌注桩基础/ m^3	16 964.6	35 121 466.12
	QL0105	承台/ m^3	95 50.2	17 295 456.57
	QL0107	基坑防护/元		2 5862 058.53
	QL010701	防护桩/ m^3	2 504.8	639 9320.4
	QL010702	冠梁/ m^3	224	360 333.37
	QL010702	钢支撑/t	81.709 4	200 393.61
	QL010703	高压旋喷桩/m	139 487.4	1 7025 914.49
	QL010706	基坑回填/ m^3	1 358.04	1 876 096.65

距和安全高度限值,项目不允许采用长螺旋高喷设备,而普通小型高喷设备又难以保证固结体施工垂直精度要求。为此,高喷前首先采用安曼 150D 型钻机进行引孔,引孔钻杆的倾斜度控制不大于0.5%。

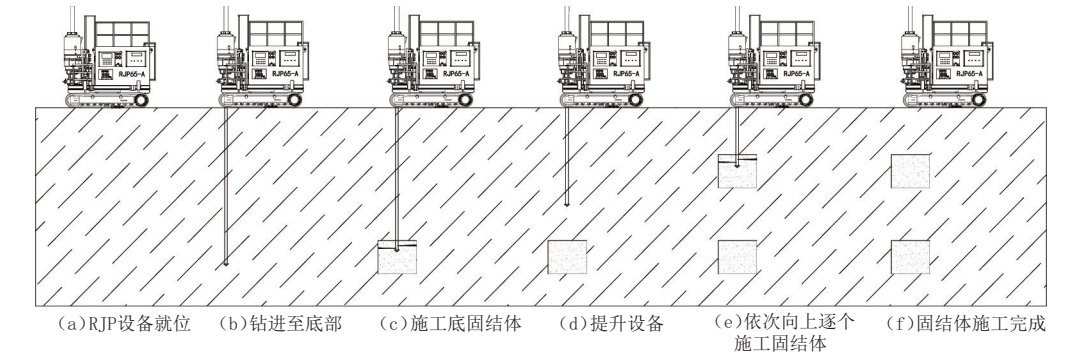


图3 固结体施工工艺流程图

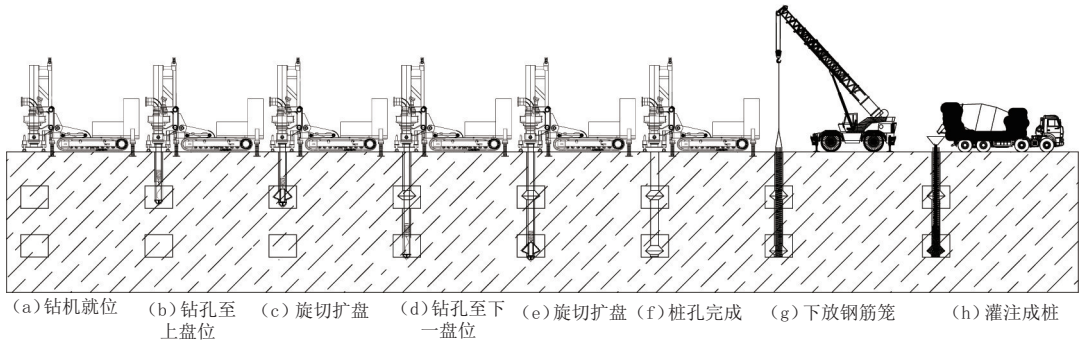


图4 扩孔工艺流程图

采用安曼 60 旋喷钻机施工固结体(见图 5)。喷射水泥浆水灰比 1.0,水泥采用 P·O42.5 普通硅酸盐水泥;喷射水泥浆压力不小于 36 MPa;钻进到指定标高方可喷射注浆,喷射注浆由下往上作业。

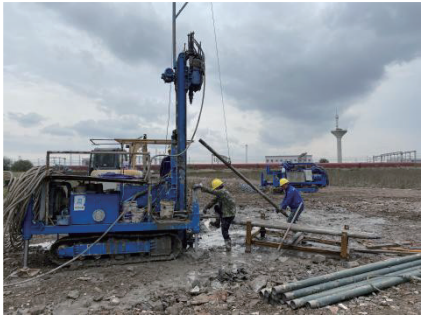


图5 固结体高喷施工

3.3 盘腔扩孔工艺与质量控制

盘腔扩孔成型是整个工艺的核心环节,针对反循环和旋挖 2 种成孔工艺,研发了配套的扩孔机具钻头(见图 6(a))。

目前基于旋挖工艺的扩孔机具已得到普遍应用。当中途钻进至某一盘位时,钻机在地面更换旋扩钻头,钻头更换耗时约 3~5 min,随后下放钻杆至盘位进行盘腔的旋切成形。通过多次更换成孔和扩孔钻头,依次反复循环,完成成孔和盘腔成形的施工。其中旋扩钻头打开尺度的判断是保证扩孔质量



图6 扩孔钻头机具

的控制重点。为此,在钻头立柱下端安装指示器,从而实现施工时的过程监控,以确保盘腔尺寸符合设计要求。

对于反循环成孔工艺,如果像旋挖工艺通过更换钻头的方式,则需要重复多次的提钻、拆杆,仅单次提钻和下钻就需耗时 4~5 h;如果通过正反转来控制扩孔钻头的开闭,则钻杆需要采用法兰连接,虽然不需换钻头,但也会极大地降低施工效率、经济效益差。为此,该项目专项研发了一种“钻扩一体钻头”^[16],如图 6(b)所示。该钻头设有内圆管、外圆管,内圆管底部连接有进尺钻头,外圆管设有旋扩支臂,其顶部用于与钻机钻杆连接;内、外套管之间设置卡扣,正常成孔时调档至内圆管牵引钻头的转动,

当到达扩孔标高时,通过反转设备 180°调挡至外圆管,从而牵引旋扩臂的转动。钻进和扩盘施工时,钻杆均设置为正转。由于钻杆不需要设置能正反转的法兰锁扣,从而降低了施工繁琐度、提高了施工效率。目前该钻头已取得国家专利授权。

以该项目为例,该装置使用流程如下:

(1)设备到达扩孔标高。此时设备停钻,记录钻杆顶端所在标高位置 H 。

(2)设备解锁。通过钻头逆时针旋转 180°解锁钻头,旋扩支臂触碰到孔壁,此时钻杆顶管下沉约 30 cm,钻杆顶端所在标高位置应为 $H-30$ cm。

(3)顺时针作业扩孔。设备下压扩孔,直至钻杆顶管下沉约 80 cm,此时旋扩支臂展开直径为 3.0 m,扩孔完成。

(4)提升钻杆。设备自动调档至内圆管,并将旋扩支臂解锁,此时钻杆顶端恢复至标高位置 H ,随后顺时针转动,驱动最底部的成孔钻头继续成孔作业。

基于反循环扩孔作业原理示意图见图 7。

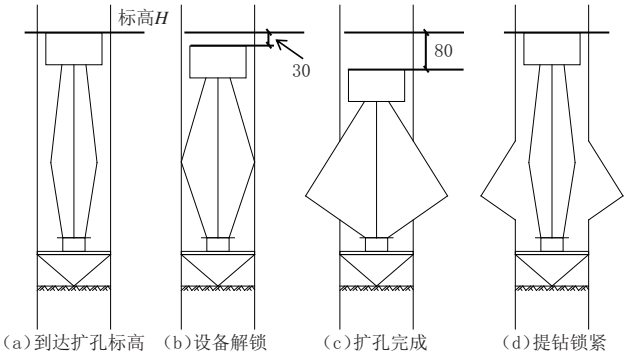


图7 基于反循环扩孔作业原理示意图(单位:cm)

4 工程质量检测

4.1 成孔质量检测

固结扩盘桩的检测包括成孔质量检测和成桩后混凝土完整性检测两部分。其中盘腔尺寸检测是质量控制重要保障。目前常用的井径仪是一种机械接触式的测量方法,由于扩盘桩盘腔部分的孔径是突出变化的,采用井径仪测量存在测量盲区,实测值会小于设计值。

井径仪盘腔检测盲区分布示意图见图 8。对于

实测值误差,分析有如下影响因素:

(1)扩孔工艺影响。不同扩孔工艺所用扩孔设备上下臂尺寸不同,形成的盘腔形状不同,从而导致的检测盲区范围不同。以目前现有扩孔设备为例,旋挖扩孔工艺形成的盘腔检测盲区更大,检测误差大,反循环工艺检测盲区相对较小,测量误差小。

(2)端部土体承载性能影响。扩孔时需要孔底部土体提供反力支撑,端部土体承载力越大,形成的盘高越小,测量盲区就越大;反之盘高越大,测量盲区越小,测量误差也越小。

(3)测量设备张开性能影响。井径仪测杆张开程度受泥浆比重、张开角度、提升速度、测杆材质等多种因素影响,泥浆比重越大、测杆材质越重,测杆张开速度越慢;张开角度越大,测杆根部弹簧张开力度也越小,测量误差越大。

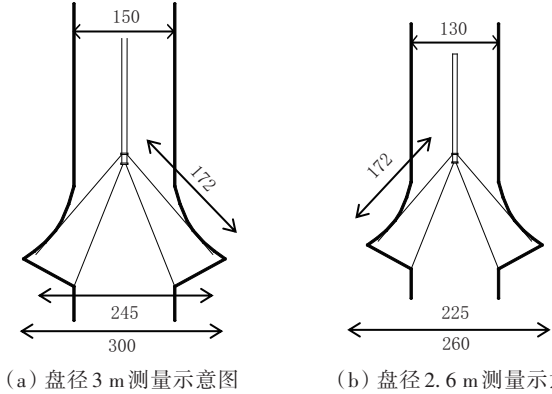


图8 井径仪盘腔检测盲区分布示意图(单位:cm)

超声波在泥浆里的传播衰减较快,采用超声波测得盘腔尺寸也存在误差,而采用旋挖成孔工艺相比反循环成孔工艺的泥浆比重稍大,超声波检测误差也较大。经项目组多次尝试和试验,最终选用超声波测量,设备规格为:发射频率不低于 90 kHz、发射功率不小于 8 W;同时将泥浆调配到重度不大于 13 kN/m³、黏度不大于 25 s、含砂量不大于 4% 的指标要求,如此可满足该项目盘腔尺寸检测精度要求。经统计,该项目盘腔尺寸检测均满足设计要求,其中 GB19-31#固盘桩成孔检测数据见表 3,盘腔尺寸超声成孔检测现场照见图 9。

表3 GB19-31#固盘桩成孔检测数据

设计上部桩径/mm	设计孔深/m	实测孔深/m	设计变径深度/(mm·m ⁻¹)	实测最小孔径(上/下)/mm
2 000	79.491	80.14	1 500/27.56	2 008/1 504
上盘盘径/深度/m	中盘 1 盘径/深度/m	中盘 2 盘径/深度/m	中盘 3 盘径/深度/m	底盘盘径/深度/m
2.91 / 34.31	2.99 / 41.65	3.01 / 49.98	2.97 / 69.62	3.02 / 78.35

4.2 成桩质量检测

在完成盘腔完整性检测验收合格并待成桩作业

完成后,采用跨孔超声波法对桩身混凝土进行完整性检测,检测方法与常规等截面钻孔灌注桩一致,于



图9 盘腔尺寸超声成孔检测现场照

此不再复述。经统计,项目固结扩盘桩桩身I类桩的占比为100%,已经施工完的234个盘,盘径大于或等于设计要求的有234个,比例为100%;不满足设计要求的有0个,比例为0%。该项目桩身混凝土完整性均满足设计要求。

4.3 浅层模型开挖实测与工艺验证

为了更直观地验证成盘施工工艺可靠性,现场开展了浅层3.0 m盘径的足尺模型施工与开挖验证试验。鉴于滨海浅层土体强度较低,需提前在盘周及盘底12 m范围内施工直径1.3 m高喷固结体,养护3 d后,旋挖扩盘并浇筑素混凝土;养护7 d、待混凝土终凝具备一定强度后,对盘体进行开挖并进行尺寸量测。盘体实测尺寸为3.03 m,满足设计要求,表明滨海软土地质条件下,固结体内旋切扩盘施工工艺安全可靠。

现场浅层模型开挖实测与工艺验证照片见图10。



图10 现场浅层模型开挖实测与工艺验证照片

5 结 语

(1)采用固结扩盘桩进行方案优化,经济效益和社会效益显著,将原设计桩长由100 m缩短至72 m,基坑支护及基础的工程概算费用由7 828万元降低到3 759万元,费用降低了52%。

(2)在固结扩盘桩结合反循环钻机设备基础上,研发了一种“钻扩一体钻头”,在不需更换钻头且

不需要反钻扩盘的情况下,可实现在地表人工控制扩盘与钻进工序交替,并提出了扩盘尺寸判定标准,大幅提高了施工效率,保证了施工质量,有助于未来大范围推广和应用。

(3)针对传统盘腔超声波法检测精度受泥浆比重影响较大的问题,对超声设备检测关键技术参数进行了研究,最终确定了满足该项目盘腔尺寸检测精度要求的测量设备规格,为日后类似工程提供参考和借鉴。经统计,项目盘腔尺寸与桩身混凝土完整性均符合设计要求。

(4)固结扩盘桩的成功应用,有效避免了滨海软土地质条件下超百米钻孔灌注桩存在的塌孔质量和安全风险,可以完全替代滨海地区中常规的超长摩擦桩,使得未来更大跨径、更高荷载的桥梁建造成为可能。

参考文献:

[1] 祝波,裴晓峰,陈永顺,等.一种复合扩盘桩施工方法及设备:ZL 2019 1 1204245.5[P].2022-03-11.

[2] 裴晓峰,祝波.一种混凝土灌注桩的施工方法及装置:ZL 201910211363.2[P].2021-04-09.

[3] 霍少磊.智能化旋扩桩承载性能试验研究[D].武汉:中国地质大学,2010.

[4] 王海山,冉衡,闫见华,等.扩盘桩在桥梁超大直径桩基础中的设计与应用研究[J].江西建材,2022(7):187-189;192.

[5] 黄生根,付明,胡然,等.基于颗粒流的多级旋扩桩承载特性宏观研究[J].长江科学院院报,2019,36(11):76-82.

[6] 刘文白,周健.扩底桩的上拔试验及其颗粒流数值模拟[J].岩土力学,2004,25(增刊2):201-206.

[7] 陈兆庚.竖向受荷喷扩锥台压灌桩变形机理与承载力计算方法研究[D].济南:山东大学,2022.

[8] 李连祥,邢宏侠,李金良,等.喷扩锥台压灌桩最优构造[J].山东大学学报(工学版),2020,50(6):82-91.

[9] 张坤标,汪益敏,陈页开,等.基于承载特性的挤扩支盘桩加固深厚软基作用机理研究[J].岩土工程学报,2024,46(增刊2):97-102.

[10] 李国维,赵星宇,张黎明,等.支盘桩加固既有填砂路基深层软土的模型试验研究[J].岩土工程学报,2024,46(8):1768-1775.

[11] 李勇,石海洋,付佰勇,等.桥梁挤扩支盘桩竖向荷载作用下群桩效应模型试验研究[J].公路,2021,66(9):202-209.

[12] 黄群标,崔立川,李勇,等.挤扩支盘桩结构设计对桩基竖向承载性能影响的试验研究[J].公路,2021,66(12):134-143.

[13] 蒲春平,罗东超,吴海平,等.基于BIM的桥梁挤扩支盘桩设计系统的研究[J].公路,2025,70(2):162-168.

[14] 蒲春平,吴海平,罗东超,等.基于BIM+IoT的桥梁挤扩支盘桩勘察—设计—施工一体化系统[J].公路,2024,69(10):107-114.

[15] 殷万寿.论现行“桥规”中的桩基理论误区和如何设计超长直径桩基问题[J].桥梁建设,2010(4):11-22;56.

[16] 祝波,张继雷,徐超,等.一种钻扩一体钻头:ZL 2024 2 1420051.5[P].2025-02-07.